

学校编码: 10384

分类号____密级____

学号: 23320081153270

UDC____

廈門大學

硕 士 学 位 论 文

基于 SOPC 的数字对讲机设计与实现

Design and Implementation of Digital Intercom

Based on SOPC

陈金榜

指导教师姓名: 陈辉煌 教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2011 年 5 月

论文答辩时间: 2011 年 月

学位授予日期: 2011 年 月

答辩委员会主席: ____

评 阅 人: ____

2011 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于
年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘 要

模拟对讲机作为短距离通信的重要工具，在社会众多行业中得到广泛的应用。但是随着模拟对讲机用户量的不断增多以及频谱资源的日益紧张，模拟对讲机通信拥堵及互相干扰的问题日益突出。与模拟对讲机相比，数字对讲机不仅具有频谱利用率高、抗干扰能力强等优点，同时还能支持短消息等数据业务。2009 年底，工业和信息化部发布了《工业和信息化部关于 150MHz、400MHz 频段专用对讲机频率规划和使用管理有关事宜的通知》，明确我国对讲机技术模拟转数字的时间表。可以说，我国对讲机数字化已是大势所趋。

正是在这个背景下，本文提出一种基于 SOPC (System On a Programmable Chip) 的公众数字对讲机实现方案。SOPC 相对于其他嵌入式系统，具有系统设计灵活，软硬件可编程、可裁减且易于软硬件升级等优点。

本文首先对国际上开放的公众数字对讲机标准——dPMR (digital Private Mobile Radio) 协议的物理层、数据链路层和呼叫控制层的功能进行分析。接着根据协议内容，提出公众数字对讲机的 SOPC 实现方案，其中数据链路层使用 FPGA 硬件电路实现，呼叫控制层使用 FPGA 上的软核处理器实现，充分发挥软硬件优势。同时，本文也对数字对讲机主要外设的控制器进行设计，如 TFT 显示器、射频模块、语音模块，并实现控制器与软核处理器的通信。最后在实验室开发的软件无线电实验箱上进行验证调试，并最终实现了数字对讲机单呼通话，组呼通话，短信息收发等基本功能。

关键词：数字对讲机；SOPC；FPGA

Abstract

As one of short-haul communication equipment, analog walkie-talkie is widely used in many fields. With the growth of user and the strain of frequency, the problem of congestion and mutual interference in analog walkie-talkie communication become serious. Compared with analog walkie-talkie, digital walkie-talkie has high utilization ratio of frequency, strong anti-interference ability, and supports data transmission. At the end of the year 2009, MIIT issues the “666” documents, which focus on converting analog walkie-talkie to digital walkie-talkie, and put emphasis on the development of digital walkie-talkie.

In this paper, we propose a scheme to implement private digital walkie-talkie system, which based on SOPC(System On a Programmable Chip). Compared with the schemes based on other embedded processor, SOPC has some advantages, such as software and hardware programmable, scalable, upgradable.

Firstly, we analyze the physical layer, data link layer and call control layer of dPMR (digital Private Mobile Radio) protocol. Secondly, the paper gives out the SOPC scheme to implement dPMR walkie-talkie. In the scheme, the data link layer is implemented by using FPGA, and the call control layer is implemented by Microblaze processor on FPGA, which fully utilizing the advantages of software and hardware. At the same time, we design some hardware controllers for system peripherals, such as TFT controller, AMBE controller, and realize the communication between controller and Microblaze. Finally, the main functions including unicast communication, multi-cast communication, and text message transmission are realized by testing the system on software radio platform.

Keywords: Digital Walkie-talkie; SOPC; FPGA

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究的背景和意义.....	1
1.2 国内外发展的现状和态势.....	2
1.3 本文的工作与结构	4
第 2 章 dPMR 协议介绍	5
2.1 dPMR 通信协议概述	5
2.2 物理层	7
2.3 数据链路层	8
2.3.1 数据帧.....	8
2.3.2 信道编解码.....	10
2.3.3 信道接入.....	16
2.4 呼叫控制层	17
2.4.1 号码编码.....	17
2.4.2 呼叫流程.....	18
2.5 本章小结	20
第 3 章 dPMR 对讲机的设计与实现.....	21
3.1 MicroBlaze 简介	21
3.2 dPMR 数字对讲机的设计框架	23
3.3 数据链路层功能模块设计.....	24
3.3.1 信道接入管理模块.....	25
3.3.2 收发缓存模块.....	27
3.3.3 编解码模块.....	28
3.3.4 信道信令管理模块.....	34
3.4 呼叫控制层实现	36
3.4.1 被叫状态转换.....	36
3.4.2 主叫状态转换.....	38
3.5 本章小结	40
第 4 章 系统外设控制器的实现	41
4.1 DDR2 控制器配置	41
4.2 Flash 控制器配置	43

4.3	TFT 显示模块	45
4.3.1	TFT 控制器的实现	45
4.3.2	Microblaze 对 TFT 控制器的操作	47
4.4	AMBE-1000 控制器	48
4.4.1	AMBE-1000 简介	48
4.4.2	AMBE-1000 控制器的实现	49
4.4.3	Microblaze 对 AMBE-1000 控制器的操作	52
4.5	ADF7021 射频控制器	53
4.5.1	射频芯片 ADF7021 简介	53
4.5.2	射频控制器的实现	55
4.5.3	射频芯片初始化配置	56
4.6	本章小结	57
第 5 章	系统调试	58
5.1	编解码模块仿真测试	58
5.2	DDR2 和 Flash 控制器测试	59
5.3	用户自定义控制器测试	61
5.3.1	TFT 控制器的测试	61
5.3.2	AMBE-1000 控制器的测试	62
5.3.3	ADF7021 控制器的测试	63
5.4	对讲机功能测试	64
5.5	本章小结	64
第 6 章	总结与展望	67
	参考文献	68
	致 谢	70
	攻读硕士学位期间发表的论文及所做的工作	72

Contents

Chapter1	Introduction	1
1.1	The Background and Meaning of The Subject.....	1
1.2	Research Status	2
1.3	The Working and Structure of Dissertation.....	4
Chapter2	dPMR Protocol Introduction.....	5
2.1	dPMR Protocol Overview	5
2.2	Physical Layer.....	7
2.3	Data Link Layer	8
2.3.1	Data Frame.....	8
2.3.2	Channel Coding and Decoding	10
2.3.3	Channel Access	16
2.4	Call Control Layer	17
2.4.1	Dialled Digits Code.....	17
2.4.2	Call Procedure.....	18
2.5	Summary	20
Chapter 3	Design and Implementation of dPMR Interphone.....	21
3.1	Microblaze Introduction	21
3.2	Design Framework of dPMR Interphone	23
3.3	Data Link Layer Functional Module Design	24
3.3.1	Management Module of Channel Access	25
3.3.2	Module of Send and Receive Buffer.....	27
3.3.3	Channel Coding-decoding Module	28
3.3.4	Management Module of Channel Signal	34
3.4	Call Control Layer Implementation	36
3.4.1	Called State Transition	36
3.4.2	Calling State Transition.....	38
3.5	Summary	40
Chapter4	Peripheral Controller Implementation.....	41
4.1	DDR2 Controller Configuration	41
4.2	Flash Controller Configuration.....	43

4.3	TFT Module	45
4.3.1	TFT Controller Implementation.....	45
4.3.2	Operation of TFT Controller by Microblaze.....	47
4.4	AMBE-1000 Controller	48
4.4.1	AMBE-1000 Introduction.....	48
4.4.2	AMBE-1000 Controller Implementation.....	49
4.4.3	Operation of AMBE-1000 Controller by Microblaze.....	52
4.5	ADF7021 Controller	53
4.5.1	ADF7021 Introduction.....	53
4.5.2	RF Controller Implementation.....	55
4.5.3	ADF7021 Configuration	56
4.6	Summary	57
Chapter5	System Test	58
5.1	Channel Coding-decoding Module Simulation Test.....	58
5.2	DDR2 and Flash Controller Test.....	59
5.3	Design Controller Test.....	61
5.3.1	TFT Controller Test.....	61
5.3.2	AMBE-1000 Controller Test.....	62
5.3.3	ADF7021 Controller Test.....	63
5.4	Intercom Functional Test.....	64
5.5	Summary	64
Chapter5	Summary	67
Reference.....		68
Acknowledgement.....		70
Published Paper and Research during Pursuing Master Degree.....		72

第1章 绪论

1.1 课题研究的背景和意义

自美国陆军通信兵研制出第一台对讲机以来,对讲机经过长期的发展,已经从军用扩展到民用,从专业化领域走向普通消费。相比于手机,对讲机不受网络限制,在网络未覆盖到的地方,对讲机也可以让使用者轻松沟通,而且它不用根据通话时间计费,更加经济实用,因此广泛应用于政府机关、制造业、采矿业、旅游业、服务业、保安等众多不同的场合和业务中,是实现短距离通信的有效手段。

随着通信技术的快速发展,数字通信系统以其优秀的性能在越来越多的应用中逐渐取代了传统的模拟通信系统,成为通信领域的主流发展方向。但是我国国内的对讲机基本都是模拟对讲机,随着对讲机用户量的不断增长及人们对通信质量要求的日益增高,模拟对讲机频谱利用率低、相互干扰较严重、业务功能较单一、通信不太稳定的问题日益突出。与传统的模拟对讲机相比,采用数字信号处理技术的数字对讲机具有抗干扰能力强、频谱利用率高、通话质量好、易于加密等特点,而且还能提供短信息等附加数据业务^[1]。

表 1-1 数字对讲机与模拟对讲机的性能比较

对讲机 种类	频带利 用率	语音 质量	语音保 密性	终端 性能	数字 业务
数字	高	高	强	强	支持
模拟	低	低	弱	弱	不支持

2009 年末,工业和信息化部发布了《关于 150MHz、400MHz 频段专用对讲机频率规划和使用管理有关事宜的通知》(以下简称“666 号文件”),通知对数字对讲机使用 150MHz 和 400MHz 频段做了明确规定,并宣布自 2011 年 1 月 1 日开始,停止该频段内模拟对讲机的核准,并且要求自 2016 年开始,市场禁售模拟对讲机。这一通知的发布,为数字对讲机打开了广阔的应用前景。

国际咨询公司 IMS 通过对全球数字对讲机市场的跟踪调查,在其咨询报告中指出,2008 年到 2013 年是对讲机从模拟转向数字的变更期。在这期间,由于一部分模拟对讲系统完成其历史使命,模拟设备将会大量减少。报告同时指出,大部分市场将会转向低成本数字对讲机,比如 DMR (Digital Mobile Radio) 和 dPMR (digital Private Mobile Radio) [2][3]。

1.2 国内外发展的现状和态势

在专用移动通信领域,比较成熟的数字技术主要集中在数字集群通信系统上,其中有欧洲的 TETRA 系统,北美的 iDEN 系统等。TETRA 系统是 ETSI (欧洲通信标准协会) 联合使用部门、制造商、检测部门等,为了满足欧洲各国的专业部门对移动通信的需要而制定的专用对讲机系统。它不仅支持数字全双工的通话服务、短信息分组数据服务,同时还提供多群组调度服务。iDEN (集成数字增强型网络) 是美国摩托罗拉公司研制和生产的一种数字专用移动通信系统。它吸收了数字蜂窝通信系统的优点,其蜂窝式的小区结构提高了网络的覆盖能力。TETRA 和 iDEN 这两种专用对讲机系统以其特有的调度功能、组呼功能和快速呼叫的特性,在指挥调度功能要求较高的特殊部门和企业中发挥着巨大的作用。我国目前使用 TETRA 的有天津水利厅、济南机场、连云港核电站等,使用 iDEN 的有浙江宁波港、天津港等。但是这两种数字集群通信系统由于功能强大,网络覆盖力广,系统复杂,因此系统设备采购、建网和终端成本比较高^[4]。

针对这种情况,ETSI 于 2005 年又提出了适用于不同场合的两种数字对讲机标准,分别为 dPMR 和 DMR 标准。其中 DMR 标准也是专用数字对讲机标准,主要应用于交通运输和公共事业部门,相对于已经成熟的 TETRA 与 iDEN 两大数字标准,具有产品成本低、技术简单的优点。而 dPMR 的主要目标客户是工业部门和服务业,包括商场、仓库、建筑公司、酒店、娱乐场所、物流和制造业等。

ETSI 发布 DMR、dPMR 数字对讲标准后,美国的主流对讲机公司摩托罗拉已于 2007 年推出基于 DMR 的数字对讲机产品,并开始在世界各国销售;日本的健伍、ICOM 公司也于 2008 年推出基于 dPMR 的数字对讲机产品。

工业和信息化部发布 666 号文件之前,我国数字对讲机研发主要集中在数字集群对讲机系统上,面对的客户主要是港口,机场等公共事业部门。因为这些部

门对对讲机的频谱资源及覆盖范围要求较高，一般模拟对讲机很难满足需要，因此对数字集群对讲机系统有刚性的需求。而像 DMR、dPMR 数字对讲机，面向的客户主要是超市、娱乐场所等，这些单位一般对对讲机的价格比较敏感，所以在 666 号文件出来之前，大部分都是购买模拟对讲机，所以国内大多数对讲机公司都没有对 DMR、dPMR 数字对讲机进行开发，大多数都处于观望态度。近两年，陆续有企业开发出 DMR 和 dPMR 相关产品和方案，如深圳好易通公司推出 DMR 数字对讲机，杭州士康公司于 2010 年推出 dPMR 数字对讲机芯片方案。

目前数字对讲机的设计方案主要有以下几种：

第一种方案是 MCU 方案。文献^[5]的实现方案主要由 MCU 控制模块，无线数据传输模块，语音编解码模块和人机接口模块构成。其中 MCU 是系统的主控制器，负责对其它模块进行控制，并实现数字对讲机的呼叫控制层及数据链路层功能。无线传输模块实现物理层的调制/解调、发送/接收等功能。语音编解码模块用来实现对讲机的语音压缩编码。这种方案的优点是开发难度较小、价格实惠、使用方便。缺点是处理器性能较低，只能支持相对比较简单人机交互功能，并且后期软件升级有一定的局限性。

第二种方案是 MCU+DSP 方案。文献^[6]的实现方案主要是使用 MCU 做为系统的主控制模块并实现对讲机的呼叫控制，用 DSP 实现物理层的调制/解调及数据链路层的信道编解码功能，使用专用射频芯片实现数据的发送/接收功能，使用语音编解码模块实现对讲机的语音压缩编码。文献^[7]的实现方案与文献^[6]大体相似，主要区别是通过 DSP 实现语音编解码功能，节省对讲机的硬件成本。这两种方案利用 DSP 出色的运算速度实现较快的语音编解码和数据链路层的信道编解码处理，缺点是处理器性能较低，其支持的软件功能有一定的局限性。

第三种方案是 ARM 方案。文献^[8]使用 ARM 处理器实现呼叫控制层功能、数据链路层的信道编解码和语音压缩编码，使用无线传输模块实现物理层功能。这种方案对 ARM 性能要求比较高，因为语音压缩编码及信道编解码会占用掉 CPU 很多资源，且语音编码效果没有专用芯片优秀。这种方案的优点是可以实现呼叫控制层功能，数据链路层功能及语音编解码的全软件集成。

第四种方案是专用芯片方案，如 CMX7141 芯片方案。专用芯片方案具有很好的价格优势，但是目前推出的方案较少，而且专用芯片在硬件升级方面有一定

的局限性。

本文采用 SOPC (System On a Programmable Chip, 片上可编程系统) 的架构来实现 dPMR 数字对讲机。由于 dPMR 协议的数据链路层功能是编解码、成解帧、信道接入控制等, 这些基本上属于算法简单, 但计算速度要求较高的处理, 非常适合用 FPGA 的硬件电路实现。对于协议的呼叫控制层, 可以通过 FPGA 上软核处理器来实现呼叫建立、保持、终止, 数据业务及外设控制等。这样在 dPMR 对讲机的实现上, 使用 SOPC 技术可以很好地发挥软件和硬件的各自优势, 提高系统的运行效率。同时, SOPC 技术具有很强的软硬件升级优势。SOPC 技术的缺点主要是目前 FPGA 价格偏贵, 但是随着微电子工业的发展, FPGA 与 ASIC 在性价比上的差距将日益减小。

1.3 本文的工作与结构

本文一共分为六章, 各章的主要内容如下:

第一章介绍了数字对讲机相对于模拟对讲机的技术优势, 以及我国数字对讲机的相关政策和国内外发展状况, 阐明了本课题的研究意义。

第二章分析 dPMR 协议的三层结构及功能, 并对里面的关键技术进行分析。

第三章根据 dPMR 协议内容提出基于 SOPC 的数字对讲机实现方案, 将协议分成软件实现跟硬件实现两部分, 即通过用户自定义 IP 实现数据链路层功能及物理层控制, 使用 Microblaze 实现呼叫控制层功能, 并对各个模块进行设计及实现。

第四章主要是实现 DDR2、Flash 控制器的移植及 TFT、语音编码器 AMBE-1000、射频芯片 ADF7021 控制器的设计, 并利用这些控制器对外设进行控制。

第五章对对讲机的各个模块及对讲机功能进行调试。

第六章是本文的总结和展望, 主要对所做工作进行阐述并指出其中的不足, 同时给出了下一步的工作方向。

第2章 dPMR 协议介绍

ETSI 在 2005 年先后推出 DMR 和 dPMR 两个数字对讲机标准。DMR 是 ETSI 为专业移动无线通讯用户（PMR）制定的数字无线通信标准，而 dPMR 标准主要面向一般商业用户，其中包括商场、娱乐场所及其他不要求高级功能设置和宽带覆盖的用户。同时，dPMR 对讲机易于实现且成本低廉，提出后得到了广泛的重视，并逐步成为国际上热门的数字对讲机标准之一。

2.1 dPMR 通信协议概述

为了细分 dPMR 对讲机的客户群，欧洲电信标准协会将协议分为点对点直通模式和中转模式。点对点直通模式属于公众对讲机标准，此模式的对讲机只进行点对点的直通呼叫。中转模式属于专业对讲机标准，它设有中转台，并可以通过中转台实现数据转发，从而增大终端间的通信距离。由于中转模式是在直通模式的基础上，进行控制层局部功能的扩展，可以说直通模式是 dPMR 协议最基本的通信模式，所以本文主要是对直通模式进行研究。

从协议的整体结构上来讲，dPMR 协议遵循常用的分层结构，自底向上分为物理层（Physical Layer，PL），数据链路层（Data Link Layer，DLL），呼叫控制层（Call Control Layer，CCL）三层结构^[9]，其结构框图如图 2-1 所示。

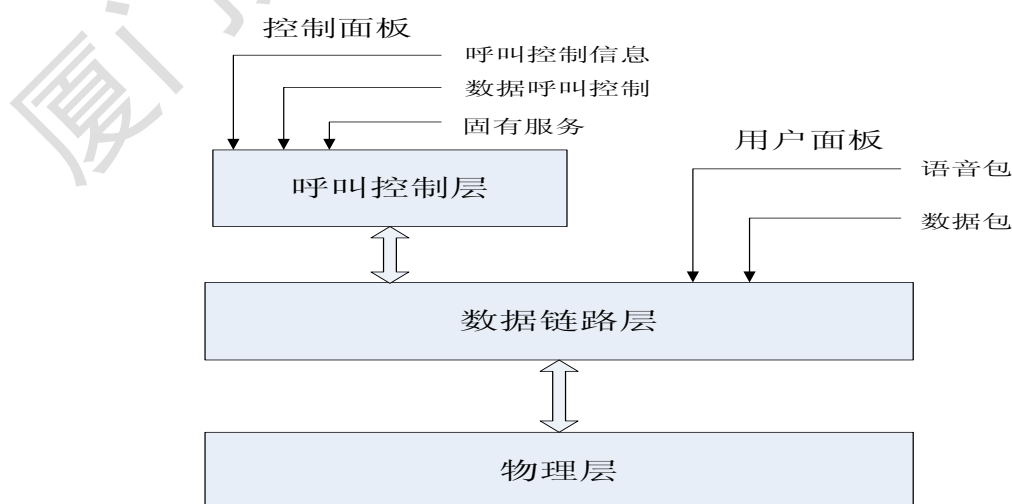


图 2-1 dPMR 协议结构

协议的第一层是物理层（PL），它为上层信息传输提供无线信道，并支持在物理媒介上传输比特流所需要的全部功能，主要有以下几点：

- ☆ 调制和解调；
- ☆ 发送和接收的转换；
- ☆ 射频特性选择；
- ☆ 比特和符号的定义；
- ☆ 频率和符号的同步；
- ☆ 传送和突发的建立。

协议的第二层为数据链路层（DLL），它负责处理数据的逻辑连接和实现通信双方之间数据帧的正确传输，同时解决多用户如何共享信道。数据链路层往上被分为两部分。一部分是控制面，用来传输具有寻址能力的信令信息或数据包，另一部分是用户面，用来传送没有寻址能力的语音数据等。其中，数据链路层通过控制面来向呼叫控制层提供服务。数据链路层实现的主要功能包含：

- ☆ 信道编解码（前向纠错编码 FEC，循环冗余码校验 CRC）；
- ☆ 交织、去交织和比特排序；
- ☆ 确认及重发机制；
- ☆ 帧和超帧的建立及帧同步；
- ☆ 信道接入控制及管理；
- ☆ 突发和参数的定义；
- ☆ 链路寻址（信源跟信宿）；
- ☆ 话音应用与物理层的接口；
- ☆ 与呼叫控制层交换信令和用户数据。

协议的第三层为呼叫控制层（CCL），它属于控制面，负责呼叫控制，并提供 dPMR 系统所支持的服务。呼叫控制层实现的主要功能包含：

- ☆ 呼叫的建立、保持和中止；
- ☆ 单呼和群呼的发送与接收；
- ☆ 目的寻址；
- ☆ 支持固有服务，包含延时接入、呼叫转移等；
- ☆ 数据呼叫控制。

2.2 物理层

物理层的任务是进行透明的比特流传输。dPMR 协议规定的物理层参数如表 2-1 所示。

表 2-1 dPMR 物理层参数

参数名称	参数值
载波频段	446.1MHz~446.2MHz
信道带宽	6.25KHz
信道数目	16
调制方式	4-FSK
多址方式	FDMA
传输速率	4.8kbps

系统采用 4FSK 的调制方式。调制时，发射端每秒发送 2400 个符号，其中每个符号携带 2bit 的信息。最大频偏 D ，定义有：

$$D = 3h/2T \quad (2-1)$$

T 表示符号周期，即 $(1/2400)$ s；

h 表示每个特殊调制的频偏系数，在 4FSK 中其值为 0.29。因此这个范围内符号的频偏为 1050KHz。在 dPMR 系统中，符号信息与比特信息的映射表如表 2-2 所示：

表 2-2 比特信息符号对应的 4FSK 频偏

Information Bits		Symbol	4FSK Deviation
Bit 1	Bit 0		
0	1	+3	+1050Hz
0	0	+1	+350 Hz
1	0	-1	-350 Hz
1	1	-3	-1050Hz

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库